

山岳工法（NATM）によるトンネル構造物の高度な防水構造の提案

A PROPOSAL OF HIGH WATERTIGHT STRUCTURE ON THE MOUNTAIN TUNNELING（NATM）

小松 敏彦¹⁾・中村 敏夫²⁾・赤坂 雄司³⁾・黒木 繁盛⁴⁾

Toshihiko KOMATSU, Toshio NAKAMURA, Yuuji AKASAKA, Shigemori KUROI

The mountain tunneling method (NATM: New Austrian Tunneling Method) has recently been adopted in an increasing number of cases in urban areas. NATM has developed for the mountain tunneling up to the present. There have been some problems of underground water drainage and ground subsidence in applying NATM to urban tunnels. It is necessary for urban tunnels that high watertightness is kept because underground water disposal effects the environment from excavation through common use. Our company developed new waterproofing technology that provides a "watertight structure that is in close contact with the shotcrete". The technology enables the construction of a highly watertight structure that is applicable to urban mountain tunnels. Applying the technology is expected to greatly improve the quality of waterproofing systems and linings not only in urban watertight tunnels but also in ordinary mountain tunnels. This paper describes the application of the technology at the Minaminagareyama Tunnel.

Key Words : mountain tunneling method, watertight tunnel, lining

1. はじめに

都市の地下空間をトンネル工法で建設する場合、その方法はシールド工法と山岳工法（NATM）に大別することができる。シールド工法は、都市部などの地下水位の高い未固結地山に対して十分な施工実績があるが、NATMは、その経済性から近年都市部での採用が増加してきた工法である。

NATMは、本来、山岳トンネルの掘削工法として開発されたものであり、都市部での適用にあたっては地下水の処理や地表面の沈下抑制、周辺構造物の変状抑制といった課題が残されている。なかでも、地下水処理は、施工時から供用に至るまで周辺環境に影響を及ぼすため、高度な止水が要求される。

当社は、新しい止水技術の開発によって、山岳トンネルで防水シートが吹付けコンクリートに密着するような防水構造を実現し、都市部にも適用できる高度なウォータータイト構造を可能にした。この技術の応用により、都市部でのウォータータイトトンネルのみならず、一般的な山岳トンネルでも防水および覆工の品質が大きく向上することが期待される。ここでは、つくばエクスプレス南流山トンネルの施工に適用した止水技術について記述する。

キーワード：山岳工法（NATM）、ウォータータイトトンネル、覆工

- 1) 前田建設工業株式会社 東関東支店 西平井作業所
- 2) 前田建設工業株式会社 土木部トンネルグループ
- 3) 前田建設工業株式会社 技術研究所
- 4) 前田建設工業株式会社 土木設計部

2. 防水工の現状と問題点

山岳工法では、覆工コンクリートの外部拘束によるひび割れ、ひび割れからの漏水を防止するため、一般に吹付けコンクリートの表面に防水シートを張付ける方法を採用している。防水シート施工の際には、吹付けコンクリートやロックボルトなどの凹凸に追従して、防水シートに適切な余裕長を確保しておく必要があるが、この余裕長が適切でない場合、防水シートに余裕過多や余裕不足が発生し、以下のような現象が発生すると考えられる。

- ① 覆工打設時にシートに引張りやたわみが生じ、コンクリートの充填を妨げる。
- ② 吹付けコンクリートと覆工コンクリート背面の拘束低減効果にばらつきが生じ、覆工コンクリートにひび割れが入りやすい。
- ③ 鉄筋組立作業において鉄筋の端部で傷つけて防水シートを破損しやすい。
- ④ 破損個所がたわみの陰になった場合、点検で見落とす可能性が大きい。
- ⑤ 破損個所の背面から水圧がかかった場合、防水シートとの境界面に水みちが発生し、広範囲の漏水を招く。

このため、防水シート背面の吹付けコンクリート表面をできるだけ平滑に仕上げる必要があるが、余吹きなどにより施工時間やコストが増大するため、十分な施工が行われていないのが現状である。

3. 新工法の提案

山岳トンネルの覆工において「コンクリートの充填を妨げず、かつ吹付けコンクリートに密着するような防水構造」の実用的な開発が強く望まれている¹⁾。防水シートが覆工コンクリート背面の拘束低減材を兼ねることから、ここでは覆工の品質にも着目し、トンネルの防水・覆工構造の品質向上のためには、現状の問題点に対してどのような改善が必要かを検討した。その結果、防水シートの出来形に求められる要件として、防水シートが吹付けコンクリート面に密着した構造であること、防水シートがトンネル形状の円滑な仕上がり形状とすることの2点が挙げられた。

新工法では、これらの要件を満足させるため、「防水シート材料と施工方法を吹付けコンクリートなどの凹凸に適応させる」という従来の考え方に対して、本来あるべき、防水シートに適切な下地を作るという考え方で新しい構造を検討した。

図1に従来工法と新工法のトンネル構造断面の模式図を示す。

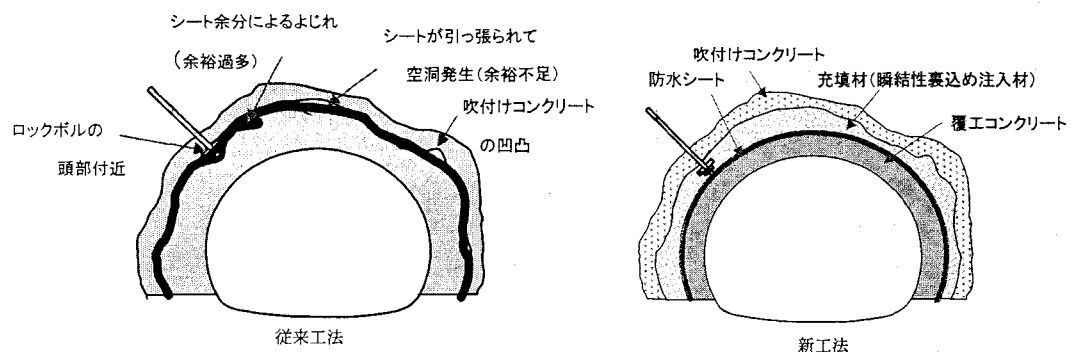


図1 トンネルの構造模式図

4. 実用化

図 1 に示すトンネル構造を成立させる上で、①施工性（施工方法）、②経済性、③品質が問題となる。以下にこれらの課題に対する対処方法について記述する。

4.1 施工性（施工方法）

図 1 に示すように、防水シートの下地を平滑に仕上げる方法として、型枠（セントルなど）をセットし、吹付けコンクリートと型枠の間に充填材を注入する方法が考えられる。また、吹付け面を整形した後にシート張りをを行う方法も考えられたが、型枠にあらかじめ防水シートを広げておくことで、シート張りの手間およびシート背面の空隙を最小限に抑えることができ、施工性・品質の改善が図れると考えられた。

施工は、防水シートを型枠の外周に沿って固定、所定の位置にセットし、その後、シートと吹付けコンクリートとの空隙に発泡モルタルなどの充填材を注入することとした。この方法により、防水シート、充填材、吹付けコンクリートを一体化し、かつ凹凸のない滑らかなシートの展張りが可能になると考えられた。なお、上記の施工方法を成立させるためには、防水シート材料、裏込め充填材料、およびシート配設設備（型枠台車）に検討、改良を加える必要があると考えられた。

検討の結果、防水シート材料は、従来工法と同じ構造（防水シート＋不織布 3mm）とし、工場でシートと不織布を接着加工して、充填材と不織布との付着強度を利用してシート全体を張付ける構造とした。また、シート配設設備にはシート展張り機を配備させることとしたが、設備製造その他、シート張り作業は、既往のトンネル施工技術で十分に対応が可能であると考えられた。図 2 に型枠架台の設備の例を示す。

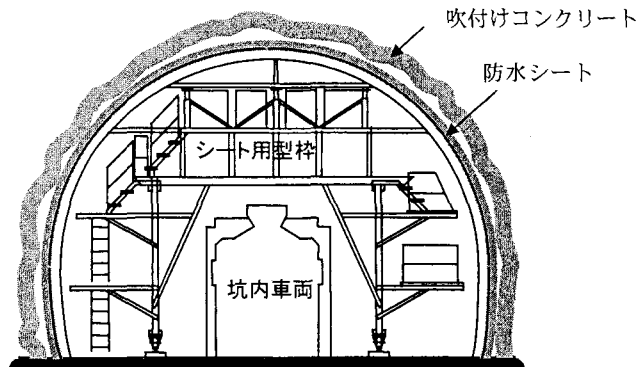


図 2 防水シートを配設するトンネル型枠架台の例

裏込め充填材料には、吹付けコンクリートおよび不織布との接着強度（接着性）、吹付けコンクリートと不織布との空隙への充填性（流動性）、充填材が妻部や下端部からリークしないよう固結時間（瞬結性）を確認する必要があると考えられた。以下に、裏込め材料の選定方法について記述する。

・裏込め材料の選定

裏込め材料として、エアーミルクとシールド工法で使用する二液型瞬結性注入材の 2 種類を候補に検討を進めた。

試験施工の結果、エアーミルクは、注入時圧力によりエアーがつぶれて材料がかさむこと、想定を上回る硬化熱が発生することが分かった。また、硬化時間が長いため、吹付けコンクリートの凹凸と妻型枠（エアー

バルク)から多量のリーク、作用荷重による型枠の変形も発生した。これに対し、シールド工法で使用される二液型瞬結性注入材は、上記のようなリークの問題がなく、作業能率も大きく改善された。この結果より、裏込め注入材として二液型瞬結性注入材を採用することとした。

・ 固結時間および接着強度

充填材料には、高流動性(充填性)のほかに、リークへの対応が容易にできること(瞬結性)が求められる。材料のゲルタイムを10~30秒の間で変化させて室内試験を行ったところ、充填性および固結時間の関係から30秒のゲルタイムが最適と判断された。

また、目標のゲルタイムから注入材の配合を決定し、吹付けコンクリートと充填材、および充填材と防水シート不織布の付着強度を確認するため、基礎実験を行った。その結果、材令2時間で吹付けと充填材(必要接着強度 $1.4 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$)、充填材と不織布(同 $1.8 \times 10^{-5} \text{N/mm}^2$)ともに、材料の自重から求められる必要接着強度の20倍(目標接着強度)を大幅に上回る結果となった。実施工では10時間以上の養生時間を計画していることから、二液型瞬結性注入材は、充填材の要求性能の一つである付着強度を十分に満足することが確認された。

・ 作業方法

裏込め材の注入は、下記の手順に従った。

- ① 防水シートを型枠に配設後、型枠の高さ、センターをセットする。
 - ② 充填(注入)範囲の外周にエアバルクを配し、妻型枠を構築する。注入口は3箇所とし、まず両肩部(SL+4m位置)から片側ずつ注入、次に天端のセンター部から注入する。
 - ③ 天端部に設置しているエア抜きから充填材がリターンするのを確認して、充填完了とする。
- 図3に妻型枠の模式図、および施工状況を示す。

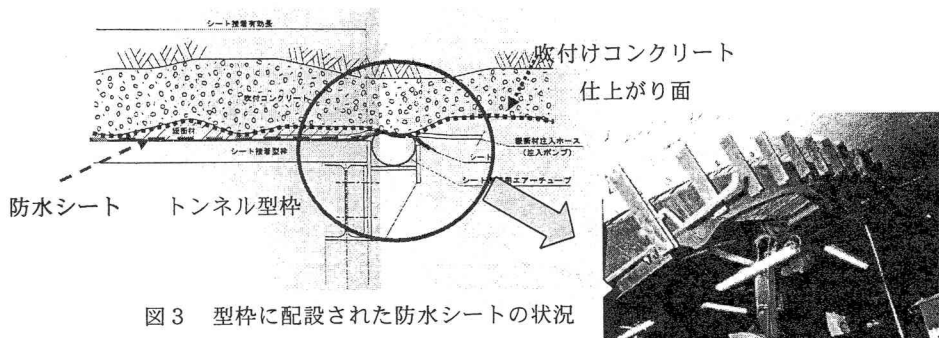


図3 型枠に配設された防水シートの状況

4.2 経済性

経済性について新工法と従来工法と比較すると、設備費(シート張り台車)で新工法が内型枠やシート配設備等により、従来工法の約2倍となった。これに対し、施工費(労務費・材料費・プラント費)は、新工法が従来工法に対して3.5%増とあまり変わらない結果となり、新工法と従来工法の差は設備費によるものであることが分かった。

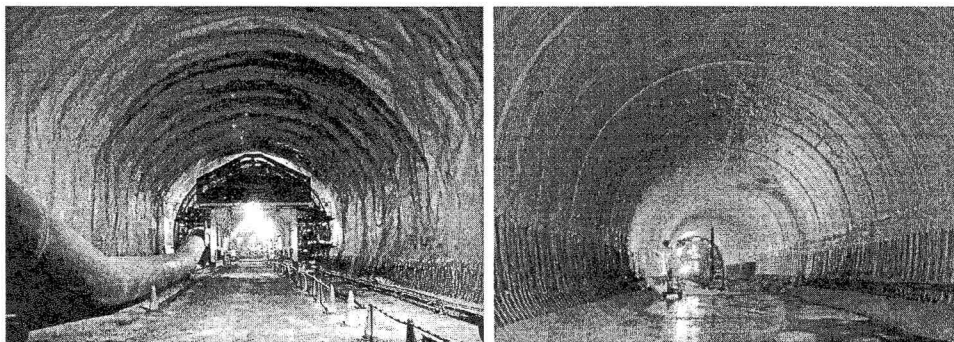
設備費の単位面積あたりの単価はトンネル延長に大きく影響されることから、当トンネルのように比較的短いトンネルの場合は、シート型枠設備を覆工セントルで兼用することにより、コスト低減を図ることが肝要だと考えられる。また、今回の施工では6m/日の施工としたが、1施工延長を10m程度まで伸ばすことは十分可能であり、労務費などを低減できるものと考えられる。充填材料の付着強度にしても、基準強度に比

較して発現強度が大きいことから、配合の検討によりコスト低減の可能性も残っている。

4.3 品質

図4に従来工法と新工法の防水シートの敷設が完了した状況を示す。

従来工法にシートの余裕過多や余裕不足が懸念されるのに対し、新工法ではシートの溶着部分を除いてはほぼ平滑に仕上がっており、所要の品質を満足しているといえる。



従来工法

新工法

図4 防水シート敷設完了状況

5. 新工法による効果

新工法により期待できる効果を以下に示す。

- ① 覆工コンクリートの品質のばらつきが少なくなる。
 - ・ 覆工コンクリートの巻厚が一定となり、防水シート面が平滑なため空隙の発生が少なくなる。
 - ・ 防水シートが滑らかな形状となり、アイソレーション機能が向上、かつ一定になる。
 - ・ シート側でのコンクリート充填の妨げが少なく、密着した構造となる。
- ② 防水性が向上する。
 - ・ 型枠長に合わせた幅の広いシートの展張りが可能になり、現場での溶着作業量を減らせるため、全体の品質の信頼性が向上する。
 - ・ ロックボルト頭部等、突起物による防水シートの破損が少なくなる。
 - ・ 鉄筋組立時に鉄筋端部でシートに傷をつけて破損させる事故が少なくなる。
 - ・ 防水シートが吹付けコンクリートに密着、かつ平滑であるため、確実なウォーターバリアの形成が可能となり、広範囲への漏水の拡大が防止できる（補修場所が絞り込める）。
- ③ コストダウンに効果を発揮する（VEの可能性）。
 - ・ シート材料の品質を低下させても防水性が向上する。
 - ・ ロックボルトの頭部処理や吹付けコンクリートを平坦に仕上げる作業が軽減できるため、掘削工期の短縮や吹付けコンクリート材料の低減を図ることができる。
 - ・ 適用する部位やシート材料の選択により要求される防水性に対応した適切な構造を実現する。（施工継ぎ目部のみ適用、上半部のみ適用、全面適用など）
 - ・ 漏水処理費を少なくできる。
- ④ 作業の環境が良くなる。
 - ・ シート布設が人力作業から機械作業となり、省力化を図ることができる。
 - ・ シートのたるみがなくなるため、鉄筋組立の作業環境が改善され、施工能率が向上する。

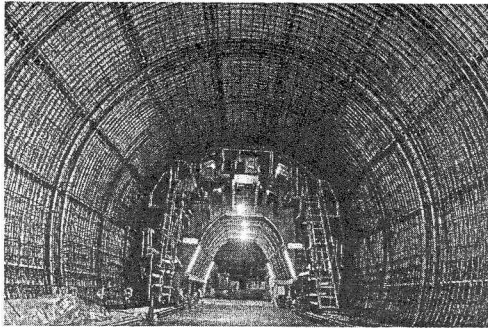
図5に、新工法による一次覆工から二次覆工までの経時変化状況を示す。



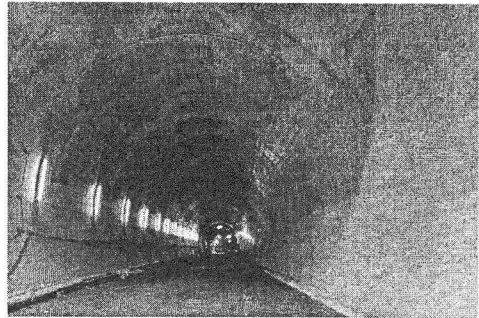
一次覆工完了状況



インポート鉄筋組立完了



アーチ鉄筋組立完了



覆工コンクリート完了

図5 新工法施工状況

6. 今後の課題とまとめ

以上、新工法の成立性について記述した。今後、防水や二次覆工の品質といったものに着目し、新工法の有意性を確認していく必要がある。

また、今後、他トンネルへ適用していく上で、吹付けコンクリート表面から湧水がある場合の排水処理、裏込め材のクラウン部への確実な充填などが課題として挙げられる。また、より一層の施工の効率性、経済性を求めて、簡易型枠、あるいは裏込め材などの開発といった課題も挙げられる。

ここで提案した新工法は、都市部での完全防水型トンネルのみならず、山岳トンネル全般の長寿命化に対して従来工法が抱える構造上の欠点を根本から改善するものである。今後、上記課題を克服して施工事例を増やし、山岳トンネルの標準工法に成長させたいと考えている。

[参考文献]

- 1) 土木学会編：トンネルコンクリート施工指針（案），平成12年7月